

Литература

1. Антонченко, В. Я. Основы физики воды [Текст] / В. Я. Антонченко, А. С. Давыдов, В. В. Ильин. – К. : Наук. Думка, 1991. – 672 с.
2. Eisenberg, D. The structure and properties of water [Text] / D. Eisenberg, W. Kauzmann. – Oxford University press, 2005. – 308 p.
3. Angell, A. In Water: A Comprehensive Treatise [Text] / A. Angell; ed. F. Franks. – New York: Plenum Press, 1982. – vol. 7.
4. Зацепина, Г. Н. Физические свойства и структура воды [Текст] / Г. Н. Зацепина. – 2-е изд. – М. : Изд-во МГУ, 1987. – 171 с.
5. Mallett, C. Frozen Food Technology [Text] / C. Mallett. – London: Published by Springer, 2012. – 368 p.
6. Малафаев, Н. Т. О взаимодействиях и динамике молекул в чистой воде [Текст] / Н. Т. Малафаев // Восточно-Европейский журнал передовых технологий. – 2011. – Т. 4, № 8(52). – С. 48-58.
7. Bersuker, I. The Jahn-Teller Effect and Vibronic Interactions in Modern Chemistry [Text] / I. Bersuker. – New York: Published by Plenum, 1984. – 319 p.
8. Pullman, B. Intermolecular interactions: from diatoms to biopolymers [Text] / B. Pullman. – New York, 1978. – 447 p.
9. Levy, Y. Water and proteins : a love-hate relationship [Text] / Y. Levy, J. Onuchic // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2004. – №101. – pp. 3325-3326.
10. Schneider, B. Hydration of the phosphate group in double-helical DNA [Text] / B. Schneider, K. Patel, H. Berman // Biophysical Journal. – 1998. – №75. – pp. 2422-2434.
11. Ebbinghaus, S. An extended dynamical hydration shell around proteins [Text] / S. Ebbinghaus, S. Kim, M. Heyden, X. Yu, U. Heugen, M. Gruebele, D. Leitner, M. Havenith // Current Issue. – 2007. – №104(52). – pp. 20749–20752.
12. Frauenfelder, H. The role of structure, energy landscape, dynamics, and allostery in the enzymatic function of myoglobin [Text] / H. Frauenfelder, B. McMahon, R. Austin, K. Chu, J. Groves // Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America. – 2001. – №98(5). – pp. 2370-2374.

УДК 547.118: 547.438: 627.257

ОЦІНКА ВПЛИВУ ФІЗИКО-ХІМІЧНИХ ФАК- ТОРІВ НА КОРОЗІЙНУ АКТИВНІСТЬ ВОДИ

В роботі було досліджено корозійні процеси та визначено рівень активності різних водних середовищ щодо металів. Визначено вплив рН, температури та мінералізації на швидкість корозії металів. Встановлено, що корозійна активність нейтрального водного середовища залежить від концентрації розчиненого кисню та від вмісту аніонів солей у воді. Доведено, що розчинені неорганічні солі суттєво прискорюють процес корозії

Ключові слова: корозійна активність, метали, кисень, мінералізація, швидкість корозії, пасиваційна киснева плівка

В работе были исследованы коррозионные процессы и определен уровень коррозионной активности различных водных сред по отношению к металлам. Определено влияние рН, температуры и минерализации на скорость коррозии металлов. Установлено, что коррозионная активность нейтральной водной среды зависит от концентрации растворенного кислорода и от содержания анионов солей в воде. Доказано, что растворенные неорганические соли существенно ускоряют процесс коррозии

Ключевые слова: коррозионная активность, металлы, кислород, минерализация, скорость коррозии, пассивационная кислородная пленка

А. Т. Тамазашвілі

Аспірант*

E-mail: tamazashvili@gmail.com

Ю. І. Мазна*

E-mail: yulya_maznaya@mail.ru

К. А. Малихіна*

E-mail: yulya_maznaya@mail.ru

М. Д. Гомеля

Доктор технічних наук, професор,
завідуючий кафедри*

E-mail: m.gomelya@kpi.ua

*Кафедра екології та технології

рослинних полімерів

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут»

пр. Перемоги, 37, м. Київ, Україна, 03056

1. Вступ

Питання захисту металів від корозії у воді та водних розчинах є дуже важливим, оскільки в промисловості,

комунально-побутових господарствах та природних умовах найбільш розповсюдженим випадком є руйнування обладнання і конструкцій саме у водному середовищі.

Успішний захист металевих водопровідних труб від корозії є однією з важливих задач. Корозія металевих труб, особливо, сталевих, веде до величезної даремної витрати металу, скорочує термін служби водопровідних ліній, є причиною аварій, збільшує шорсткість внутрішньої поверхні стінок труб і, отже, втрати напору в них, що пов'язане з додатковими витратами на подачу води. Таким чином, корозія труб викликає збільшення як будівельних, так і експлуатаційних витрат в системах водопостачання [1].

2. Огляд стану питання

Корозія металевих труб у водопровідній мережі є складним електрохімічним та фізико-хімічним процесом, що відбувається на поверхні металу і залежить від корозійних властивостей води, які не завжди можуть бути усунені, але зазвичай можуть контролюватися економічно доцільним способом [2]. Корозійна активність води залежить від хімічних факторів, таких як рН, лужність, розчинений кисень, загальний вміст розчинених твердих речовин і фізичних властивостей, таких як температура, витрата і швидкість руху води, а також природа матеріалу труби [3 – 5]. У процесі очищення води, можна впливати на рН, лужність і жорсткість за кальцієм, каламутність та кольоровість води для контролю процесів корозії та для запобігання внутрішній корозії систем розподілу води [6, 7].

Тому в даній роботі було вивчено процеси корозії металів у водних середовищах при різних концентраціях солей та окисників та при різних умовах: температурах, рН, аерації.

3. Експериментальні дослідження, аналіз та інтерпретація отриманих результатів

Були проведені дослідження з визначення корозійної активності водних середовищ щодо різних металів: сталі Ст.3, сталі 20, нержавіючої сталі 12Х18Н10Т, міді М-2 і латуні Л62.

Оцінку корозійної активності проводили в статичних і динамічних умовах (при перемішуванні води магнітною мішалкою) в діапазоні температур 15 - 75 °С. Тривалість випробувань до 200 годин. Швидкість корозії визначали масометричним методом та методом поляризаційного опору. Результати випробувань отримували усередненням даних з 4 - 6 паралельних дослідів [8, 9]. Поляризаційний опір – величина, обернена швидкості корозії:

$$V = K / R_{\text{сер}}, \quad (1)$$

де V – швидкість корозії, мм/рік; K – константа, мм/рік/Ом, $R_{\text{сер}}$ – поляризаційний опір, Ом.

Про вплив рН середовища на корозійну агресивність води можна судити по рис. 1. З підвищенням рН середовища середнє значення поляризаційного опору дистильованої води ($C(\text{Na}_2\text{SO}_4) = 0,02 \text{ г/дм}^3$) при використанні зразків із сталі 20 зростає. Це обумовлено зниженням концентрації протонів у воді, що сприяє зниженню швидкості корозії з водневою деполаризацією. В статичних умовах максимальне

значення середнього поляризаційного опору досягнуте при $\text{pH} = 12$ і сягає $R_{\text{сер}} = 556,5 \text{ Ом}$. В даному випадку, не дивлячись на зростання середнього поляризаційного опору, швидкість корозії є ще досить значною. Це обумовлено тим, що в статичних умовах дифузія кисню недостатня для створення стабільної пасиваційної плівки, але достатня для окиснення металу.

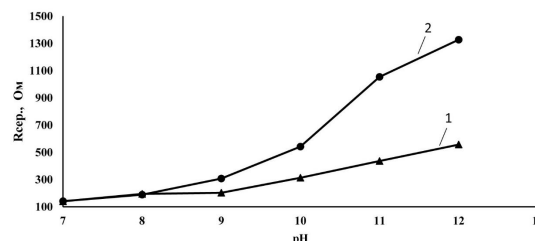


Рис. 1. Залежність поляризаційного опору електродів із сталі Ст. 20 у дистильованій воді від реакції середовища

Примітка: 1 – статичні умови; 2 – динамічні умови

Відомо, що для водопровідної води, артезіанської води та води з поверхневих водойм поляризаційний опір в статичних умовах може сягати 500 – 800 Ом. Очевидно, що досить значна швидкість корозії при $\text{pH} = 12$ обумовлена, в даному випадку, кисневою деполаризацією, внаслідок достатньої розчинності кисню у воді.

В динамічних умовах зростання поляризаційного опору з ростом рН середовища виражено в більшій мірі. В даному випадку, як і в статичних умовах, із зростанням рН вклад водневої деполаризації корозії зменшується.

В динамічних умовах при високих значеннях рН середовища, не дивлячись на кращу дифузію кисню до поверхні сталі, швидкість корозії знижується. Ймовірно, це обумовлено утворенням пасиваційної плівки на поверхні сталі.

За низьких значень рН середовища пасиваційна плівка, що утворюється в динамічних умовах, недостатньо ефективна, щоб нейтралізувати процес із водневою деполаризацією.

Про вплив кисню на процес корозії сталі у воді можна судити по результатам, які наведено в табл. 1.

В даному випадку вміст кисню регулювали за рахунок зміни концентрацій сульфату натрію у воді. Досліди із сульфатом натрію проводили, щоб оцінити вплив неорганічної солі на корозійну активність води. Вплив сульфату натрію був близьким до сульфату натрію, тому що солі використовувались в однакових концентраціях.

Як видно з табл. 1, при кімнатній температурі, за умов зниження концентрації кисню (реагент сульфід натрію), швидкість корозії знижувалася, що видно по підвищенню поляризаційного опору, при цьому при використанні Na_2SO_4 до $\text{pH}=9$ з підвищенням вмісту сульфату натрію швидкість корозії зростає. При $\text{pH}=9,6$ подальшого зростання швидкості корозії із підвищенням концентрації Na_2SO_4 не відмічено.

В меншій мірі сульфід натрію впливає на корозію сталі 20 при температурі 75 °С. В даних умовах розчинність кисню у воді низька настільки, що не за-

лежить від вмісту Na_2SO_3 , а її корозійна активність визначається прискоренням реакції окислення заліза при підвищенні температури.

Таблиця 1

Залежність поляризаційного опору на електродах із сталі 20 у дистильованій воді від концентрації Na_2SO_4 та Na_2SO_3

№ п/п	Реагент	Концентрація, г/дм ³	pH	Концентрація O_2 , мг/дм ³	Середній поляризаційний опір, R_p , Ом	
					Статичні умови	
					t = 20°C	t = 75°C
1	Na_2SO_4	0,02	7	6,18	224	183,1
		0,5	8,8		198,4	122,7
		1	9,18		138,5	104,6
		2	9,6		155,2	120,6
		5	9,6		204,3	114,5
2	Na_2SO_3	0,5	8,8	2,185	751,9	192
		1	9,18	1,58	559	156,4
		2	9,6	1,45	772	211
		5	9,6	1,35	766,2	145,4

Очевидно, що при повному видаленні з води кисню іншими фізичними або хімічними методами без внесення неорганічних солей, ефект по зниженню корозії був би значно вищим.

При підвищеній температурі (табл. 1) при підвищенні мінералізації відмічено зростання швидкості корозії. Це також підтверджують результати, отримані при вивченні корозійної активності високомінералізованих середовищ.

В якості робочих середовищ були використані освітлена шахтна вода з мінералізацією 27,8 г/дм³, що містить хлориди в концентрації 14875 мг/дм³ і сульфати в концентрації 316 мг/дм³, і модельний розчин з мінералізацією 30,5 мг/дм³ і вмістом хлоридів та сульфатів 16917 мг/дм³ і 1725 мг/дм³ відповідно. Обидва розчини по складу близькі до вельми корозійної агресивно морської води.

В якості середовищ порівняння використовували водопровідну воду і артезіанську воду, які відповідають вимогам до якості питної води.

Результати з оцінки корозійної активності середовищ методом масометрії наведені в табл. 2.

Як видно з таблиці, при температурі 15 °C, підвищений рівень мінералізації (~ 28 г/дм³) у шахтній воді незначно впливає на швидкість корозії Ст.3. Швидкість корозії даної сталі, визначена методом масометрії, близька до швидкості корозії в артезіанській і водопровідній воді. Хоча в модельному розчині з мінералізацією ~ 30 г/дм³ швидкість корозії сталі 3 трохи вище і досягає 0,0760 мм/рік, що в два рази вище, ніж у водопровідній воді. Можливо деяке зниження корозійної активності в освітленій шахтній воді обумовлено наявністю амонію. Однак і в модельному розчині швидкість корозії Ст.3 була незначною.

У загальному випадку, відмінність у корозійній активності нейтральних водних середовищ з різним рівнем мінералізації в значній мірі обумовлено кисневою деполаризацією і залежить від концентрації кисню у воді.

Вельми стійкою до корозії була нержавіюча сталь, яка в мінералізованих середовищах кородувала зі швидкістю <0,001 мм / рік і її можна за цим показником віднести до абсолютно стійкого матеріалу (I група корозійної стійкості, бал корозійної стійкості 1). У артезіанській і водопровідній воді дану сталь можна було віднести до II групи корозійної стійкості (вельми стійкі) відповідно з балами корозійної стійкості 2 і 3.

Пояснити більшу стійкість до корозії нержавіючої сталі в мінералізованих середовищах можна тим, що її пасивність завжди обумовлена наявністю міцної пасиваційної кисневої плівки на поверхні металу через наявність у приповерхневому шарі іонів d-металів (Ni, Cr, та ін.) При цьому хлорид- і сульфат аніони мало впливають на її стабільність, у той час, коли іони жорсткості сприяють її зміцненню.

Таблиця 2

Визначення швидкості корозії металів у водних

Метал	Маса зразка, г		Площа поверхні зразка, S·10 ⁻³ , м ²	Час корозії, год	Швидкість корозії	
	до	після			W, г/(м ² ·год)	W', мм/рік
Освітлена шахтна вода						
Сталь Ст.3	46,9332	46,9161	6,276	71,66	0,0380	0,0423
Мідь М-2	7,4667	7,4613	2,029	71,25	0,0374	0,0364
1	2	3	4	5	6	7
Латунь Л62	9,1264	9,1227	1,350	71,08	0,0386	0,0420
Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	20,0693	20,0692	1,902	71,08	0,0007	0,0008
Модельний розчин						
Сталь Ст.3	26,5727	26,5468	2,294	165,50	0,0628	0,0760
Мідь М-2	7,8622	7,8585	2,129	72,00	0,0241	0,0235
Латунь Л62	7,9216	7,9187	1,198	71,50	0,0339	0,0369
Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	14,1923	14,1922	1,752	71,33	0,0008	0,0009
Артезіанська вода						
Сталь Ст.3	47,6676	47,6525	6,411	70,83	0,0324	0,0360
Мідь М-2	8,5143	8,5128	2,272	71,75	0,0092	0,0090
Латунь Л62	22,8538	22,8508	3,892	71,75	0,0112	0,0122
Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	15,9358	15,9356	1,778	71,83	0,0016	0,0017
Водопровідна вода						
Сталь Ст.3	15,6444	15,6324	1,827	168,00	0,0390	0,0435
Мідь М-2	7,4610	7,4592	2,027	168,00	0,0053	0,0052
Латунь Л62	7,9213	7,9199	1,219	168,00	0,0066	0,0068
Нержавіюча сталь 12Х18Н10Т	15,9213	15,9212	1,778	72,00	0,0008	0,0009

середовищах при T = 15 °C

Зовсім інша картина спостерігається при корозії металів, пасивність яких обумовлена утворенням міцної оксидної плівки. При цьому в артезіанській і

водопровідній воді утворення щільної пасиваційної плівки забезпечує їм стійкість до корозії на рівні II групи стійкості (вельми стійкі). У мінералізованих середовищах швидкість корозії латуні і міді на порядок вище (III група корозійної стійкості), на рівні Ст.3. Очевидно, що і в даному випадку, за рахунок високої електропровідності розчину і великих відстаней між катодною і анодною областю іони міді та цинку переходять в розчин, що заважає утворенню міцної оксидної плівки (про перехід міді в розчин можна судити з придбання розчином зеленого забарвлення). Надалі пасивація латуні і міді відбувається адсорбційним шаром кисню, як і у випадку пасивації сталі.

Слід відмітити, що в межах вмісту мінеральних солей до 30 г/дм³ розчинність кисню у воді не залежить від рівня мінералізації (табл. 3). При цьому концентрація кисню у воді при температурах до 50°C достатня для забезпечення корозії металів, а у випадку нержавіючої сталі – для створення пасиваційної кисневої плівки.

Таблиця 3

Концентрації розчиненого кисню у водних середовищах

Водне середовище	Т, °C	Концентрація розчиненого кисню, мг/дм ³	
		В статичних умовах	При перемішуванні
Освітлена шахтна вода	15	8,30	8,46
	50	6,42	-
Модельний розчин	15	9,60	9,62
	50	7,12	-
Артезіанська вода	15	8,15	9,23
	50	5,74	-
Водопровідна вода	15	8,88	10,01
	50	6,42	-

Як видно з табл. 4, при 15 °C швидкість корозії сталі Ст.3 і сталі 20 в високомінералізованих середовищах близька до швидкості корозії у водопровідній воді. Однак при підвищенні температури всього на 5 °C (до 20°C), швидкість корозії сталі Ст.3 зростає з 0,0380 г/м²год до 0,0624 г/м²год. При 30 °C швидкість корозії сталі Ст.3 і сталі 20 перевищує 0,1 г/м²год, тоді як у водопровідній воді швидкість корозії даних металів при 30 °C у два рази нижче.

Таким чином, при незначному підвищенні температури води корозійна активність у розчинах з високим рівнем мінералізації, включаючи і шахтну воду, значно зростає (швидкість корозії зростає в 1,5 - 2 рази).

Вельми стійкою до корозії виявилася нержавіюча сталь 12X18H10T. Швидкість корозії даного матеріалу не перевищувала 0,0009 г/м²год (0,0010 мм/рік) як у водопровідній воді, так і розчинах з високими концентраціями солей незалежно від температури. У даному випадку нержавіюча сталь 12X18H10T є досить стійким до корозії матеріалом.

Сильно відрізняються корозійною активністю мінералізовані водні середовища стосовно міді та латуні. У порівнянні з водопровідною водою швидкість корозії міді і латуні в розчинах солей зростає майже на порядок і досягає значень близьких до швидкості корозії нелегованої сталі. Обумовлено це руйнуванням оксидної плівки на поверхні металів, за рахунок високої електропровідності мінералізованих середо-

вищ. Тому стійкість даних металів до корозії головним чином визначається концентрацією солей в воді. З підвищенням температури швидкість корозії міді та латуні також зростають, хоча і в меншій мірі, як сталі Ст.3.

Таблиця 4

Залежність швидкості корозії металів від типу корозійного середовища і температури

Метал	Середовище	Температура, °C	Швидкість корозії	
			W, г/м ² год	W', мм/рік
Сталь Ст.3	Водопровідна вода	15	0,0390	0,0435
		20	0,0432	0,0481
		25	0,0483	0,0534
		30	0,0516	0,0574
	Модельний розчин	15	0,0628	0,0760
		20	0,0768	0,0855
		25	0,0828	0,0922
		30	0,1049	0,1167
	Освітлена шахтна вода	15	0,0380	0,0423
		20	0,0624	0,0695
		25	0,0868	0,0966
		30	0,1012	0,1126
Сталь Ст.20	Водопровідна вода	15	0,0384	0,0427
		20	0,0422	0,0496
		25	0,0461	0,0513
		30	0,0495	0,0550
	Модельний розчин	15	0,0464	0,0516
		20	0,0634	0,0705
		25	0,0787	0,0875
		30	0,1025	0,1178
	Освітлена шахтна вода	15	0,0425	0,0473
		20	0,0621	0,0690
		25	0,0759	0,0844
		30	0,1036	0,1152
Нержавіюча сталь 12X18H10T	Водопровідна вода	15	0,0008	0,0009
		20	0,0008	0,0009
		25	0,0008	0,0009
	Модельний розчин	15	0,0008	0,0009
		20	0,0008	0,0009
		25	0,0009	0,0010
	Освітлена шахтна вода	15	0,0007	0,0008
		20	0,0008	0,0009
		25	0,0009	0,0010
Мідь М-2	Водопровідна вода	15	0,0053	0,0052
		20	0,0058	0,0057
		25	0,0062	0,0061
	Модельний розчин	15	0,0241	0,0235
		20	0,0263	0,0258
		25	0,0386	0,0379
	Освітлена шахтна вода	15	0,0374	0,0364
		20	0,0382	0,0374
		25	0,0391	0,0384
Латунь Л62	Водопровідна вода	15	0,0066	0,0068
		20	0,0074	0,0081
		25	0,0087	0,0095
	Модельний розчин	15	0,0339	0,0369
		20	0,0498	0,0542
		25	0,0633	0,0689
	Освітлена шахтна вода	15	0,0386	0,0420
		20	0,0521	0,0567
		25	0,0687	0,0798

Спеціально проведені дослідження показали, що швидкість корозії металів у водних середовищах в діапазоні рН від 6,5 до 8,5 практично не залежить від рН середовища. Тому очевидно, що корозія металів у водних середовищах в даному випадку проходить за рахунок кисневої деполяризації. При цьому при високих концентраціях солей у воді за рахунок високої електропровідності розчинів катодні і анодні ділянки кородуючих металів знаходяться на великій відстані. Це заважає утворенню щільних оксидних плівок на поверхні металів, а значить уповільнення швидкості корозії з часом не відбувається. Найбільш виражено це явище для латуні і міді. У випадку сталі 20 та Ст.3, коли і прісних водах не утворюється щільна оксидна плівка, даний процес грає меншу роль. Проте при високій мінералізації води відмічено різке підвищення швидкості корозії сталі Ст.3 при підвищеній мінералізації температури, очевидно за рахунок руйнування пасиваційної кисневої плівки на поверхні металу.

4. Висновки

Показано, що з підвищенням рН середовища середній поляризаційний опір в дистильованій воді зростає. Це обумовлено зниженням концентрації протонів у воді, що сприяє зниженню швидкості корозії з водневою деполяризацією.

Встановлено, що корозійна активність нейтрального водного середовища залежить від концентрації розчиненого кисню та від вмісту аніонів солей у воді. Доведено, що неорганічні солі суттєво прискорюють швидкість корозії нелегованої сталі, міді та латуні.

З'ясовано, що при температурі 20 °С, при зниженні концентрації кисню в статичних умовах, швидкість корозії знижується. При температурі 75 °С початкова концентрація кисню, так само як і рН середовища, мало впливають на корозійну активність води, так як в цьому випадку корозія сталі в основному визначається хімічною взаємодією металу з водою.

Встановлено, що швидкість корозії нелегованої сталі, латуні та міді в високомінералізованих середовищах зростає з підвищенням температури.

Література

1. Фрог, Б. Н. Водоподготовка [Текст]: учебн. пособие для вузов / Б. Н. Фрог, А. П. Левченко // М.: Издательство МГУ, 1996. – 680 с.
2. Do-Hwan, K. Control of corrosive water in advanced water treatment plant by manipulating calcium carbonate precipitation potential [Текст] / K. Do-Hwan, C. Jae-Hwan, H. Soon-Heon, K. Dong-Youn, K. Chang-Won // *Korean Journal of Chemical Engineering*. – 2009. – №26 (1). – P. 90-101.
3. McNeill, L.S. Phosphate inhibitors and red water in stagnant iron pipes [Текст] / L. S. McNeill, M. Edwards // *Journal of Environmental Engineering*. – 2000. – №126 (12). – P. 1096 - 1102.
4. Volk, C. Practical evaluation of iron corrosion control in a drinking water distribution system [Текст] / C. Volk, E. Dundore, J. Schiermann, M. Lechevallier // *Water Research*. – 2000. – №4 (6) – P. 1967 - 1974.
5. Rossum, J. R. An evaluation of calcium carbonate saturation index [Текст] / J. R. Rossum, D. T. Merrill // *Journal AWWA*. – 1983. - №75 (2). – P. 95 – 100.
6. Schock, M. R. Effect of container type on pH and alkalinity stability [Текст] / M. R. Schock. and S. C. Schock // *Water Research*. – 1982 – №16(10). – P. 1455 – 1464.
7. Rooklidge, S.J. Corrosion control enhancement from a dolomite-amended slow sand filter [Текст] / S. J. Rooklidge, L. H. Ketchum Jr. // *Water Research*. – 2000. - №36 (11). – P. 2689 - 2694.
8. Фомин, Г. С. Коррозия и защита от коррозии. Энциклопедия международных стандартов [Текст] / Г. С. Фомин. – М.: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 360 с.
9. Гомеля, Н. Д. Ингибиторы коррозии стали на основе алкилсульфатов для водооборотных систем [Текст] / Н. Д. Гомеля, Г. Л. Шутько, Т. А. Шаблій // *Экотехнологии и ресурсосбережение*. – 1996. - № 5 - 6. - С. 42 - 45.
10. Беличенко, Ю. П. Замкнутые системы водообеспечения химических производств [Текст] / Ю. П. Беличенко. – М.: Химия, 1990. – 208 с.